



Prosjektrapport

Synlighetsanalyse vindkraftanlegg



Tittel: Synlighetsanalyse vindkraftanlegg
Forfatter: Stian Rostad og Floris Groesz
Prosjektleder: Floris Groesz
Oppdragsgiver: Miljødirektoratet

Versjon	Dato
1	21. februar 2022
2	23. mars 2022

Blom Norway AS

Fornebuveien 7

1366 Lysaker Epost:

Org nr 982 725 402

Kontaktperson: Floris Groesz

Epost: floris.groesz@blom.no

Telefon: 98630541



INNHold

Innhold	3
Forord.....	4
1 Introduksjon	5
2 Prosjektområde og data.....	6
3 Metoder	8
4 Resultater	10
5 Diskusjon	19
6 Leveranse	21
Referanser	23
Appendix - informasjon om Grass Viewshed.....	24

FORORD

Denne rapporten beskriver arbeidet som ble gjennomført som et konsulentoppdrag for Miljødirektoratet i januar/februar 2022.

Oppdragsnummer: 21087691

Kontaktperson hos oppdragsgiveren er Svein Grotli Skogen.

1 INTRODUKSJON

1.1 Generell bakgrunn og mål

Miljødirektoratet ønsker at det gjennomføres en synlighetsanalyse for alle norske vindkraftanlegg med turbiner av moderne dimensjoner basert på datagrunnlaget oppgitt under. Analyseresultatet skal dokumentere eksponeringen mot vindturbiner fra alle 50x50 m ruter i et rutenett som dekker hele fastlands-Norge og aktuelle områder i sjø.

2 PROSJEKTOMRÅDE OG DATA

2.1 Prosjektområde

Prosjektet er definert som Norges landareal pluss havarealet maksimalt 40 kilometer fra turbinene som skal analyseres.



Figur 1. Prosjektområde med turbinposisjoner i blått.

2.2 Data

2.2.1 Turbindata

Turbindata ble levert av oppdragsgiveren 17.01.2022.

Turbiner2021_synlighetsanalyse.shp

Egenskap	beskrivelse	kommentar
FID	Unik ID	
Shape	Shape type	Alle: Point ZM
objType	Objekttype	Alle: Vindturbin
uttakDato	Dato for uttak	07.09.2021, 21.09.2021, 24.06.2021
DN_ID	Unikt nummer til anlegg	
Navn	Navn til anlegg	
Prosjektst	Prosjektstatus	I drift eller under bygging
Antall_tur	Antall turbiner per anlegg	
Idriftsatt	År da anlegget ble satt i drift	
Navhøyde	Høyde i meter	
Rotordiame	Rotordiameter i meter	
Totalhoyde	Totalhøyde i meter	

Antall turbiner: 1379

Antall anlegg: 62

Totalhoyde ble brukt som høyde i synlighetsberegningene.

2.2.2 DTM50 og DTM10

DTM50 og DTM10 terrengmodell ble lastet ned 17.01.2021 fra hoydedata.no.

2.2.3 FKB kystlinje og landareal

Datasettet FKB kystlinje ble brukt for å skille landareal fra havarealer.

Landarealavgrensningen fra geonorge.no ble brukt for å maskere bort arealer over Sverige.

3 METODER

3.1 Modul synlighetsanalyse

Synlighetsanalysene ble gjennomført med GRASS modulen `r.viewshed`.

Denne modulen beregner synlighet av et punkt i det omliggende terrenget. Med bruk av en terrengmodell og lokasjonen (pluss høyden) til et objekt, kan den beregne hvilke celler i terrengmodellen er synlige fra den lokasjonen. Omvendt betyr det også at man kan se objektet fra de samme cellene.

Viktige parametere som må velges og verdiene som vi har brukt.

Parameter	Verdi brukt	forklaring
Consider the curvature of the earth (current ellipsoid)	TRUE	Tar man hensyn til jordkromming i analysen. Verdi=TRUE. Det betyr ja.
Consider the effect of atmospheric refraction	TRUE	Ter man hensyn til lysest refraksjon i analysen. Verdi= TRUE. Det betyr ja
Refraction_coeff	0.13	Brukt refraksjonskoeffisient.
Observer_height	Turbin makshøyde	Hentet fra egenskap «Totalhøyde» fra turbindataene
Target_elevation	1,5 meter	Høyde over terrenget i cellen hvorfra man (eventuelt) kan se turbinen.
Max_distance	40 km	Maksimal distanse for synlighetsanalysen.

3.2 Raster land-hav

Datasettet «Kystkontur» fra SOSI FKB-Vann ble brukt sammen med datasettet «Administrative enheter fylker» til å lage en 50 meter raster. Resultatet gjør det mulig å skille mellom rasterceller som dekker Norges fastland, havet, og utlandet (Sverige).

3.3 Prosesseringsløype

Synlighetsanalysen ble kjørt separat for hver turbin, men en maksimal distanse på 40 kilometer. Resultatrasteret med verdiene 0 (ikke synlig) og 1 (synlig) blir lagret.

3.3.1 Produkt 1: synlighet antall turbiner

Alle synlighetsraster (1379): klippes ut i avstandsintervaller: (buffer per turbin on the fly) og slås sammen til 4 landsdekkende raster i ulike avstandsklasser:

- 0 – 10 km
- 0 – 20 km
- 0 – 30 km
- 0 – 40 km

Verdien i rastrene representerer antall turbiner som er synlige for de ulike avstandsintervallene.

De 4 rastrene ble fordelt i land og hav celler. Land og hav rasteret ble brukt for å fordele cellene.

Resultatet blir da 4 synlighetsrastre for hav og 4 for land.

3.3.2 Produkt 2: synlighet antall anlegg

Alle synlighetsraster (1379): klippes ut i avstandsintervaller: (buffer per turbin on the fly), per anlegg.

Verdiene i rastrene representerer antall anlegg som er synlige for de ulike avstandsintervallene.

Hver av de 4 rastrene per anlegg ble fordelt i land og hav celler. Land og hav rasteret ble brukt for å fordele cellene.

Resultatet blir da 4 synlighetsrastre for hav og 4 for land.

3.3.3 Produkt 3: synlighet antall turbiner, per anlegg separat

Samme produkt som produkt 1, men da per anlegg separat.

Per anlegg (62) leveres det 4 synlighetsrastre for hav og 4 for land.

3.4 Sensitivitetsanalysen

Synlighetsanalysen har to viktige inputvariabler som påvirker resultatene: refraksjonskoeffisienten og oppstillingshøyde (av den som observerer turbinen). For refraksjonskoeffisienten har vi bruk 1.3, som er standard ifølge litteraturen. Som oppstillingshøyden har vi brukt 1,5 meter, som oppdragsgiveren har bestemt.

For å undersøke hvor stort utslag på resultatene endringer i disse variabler gir, har vi valgt ut 3 turbiner og kjørt analysene med ulike inputvariabler. Turbinene nr 456, 873, og 1310 ble analysert. Analysen ble gjort fra 0 til 40 kilometer avstand.

I tillegg har vi kjørt analysen med en høydemodell med 10 meter celler i stedet for 50 meter.

4 RESULTATER

4.1 Areal tall

Tabell 1. Synlighet av 1 eller flere turbiner oppsummert for hele landet. Areal i km².

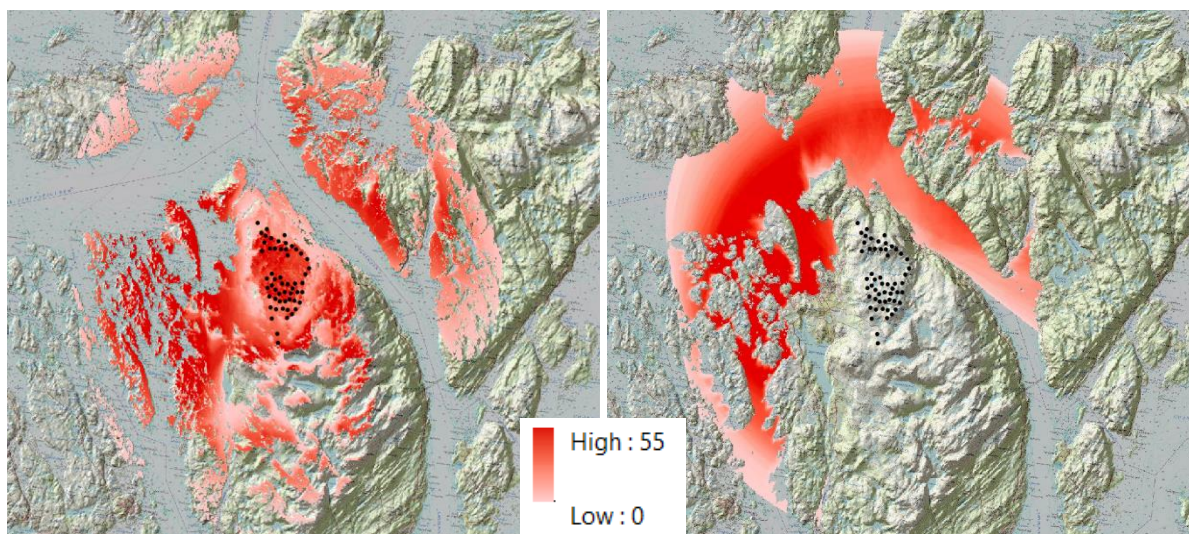
Synlighet av 1 eller flere turbiner				
	Avstand			
	0-10 km	0-20 km	0-30 km	0-40 km
Land	8 066.28	14 576.10	19 650.98	23 614.43
Hav	4 819.43	17 367.08	34 427.01	53 375.93
Totalt	12 885.71	31 943.18	54 077.99	76 990.36

Tabell 2. Synlighet av turbiner, gruppert per antall, oppsummert for hele landet. Areal i km².

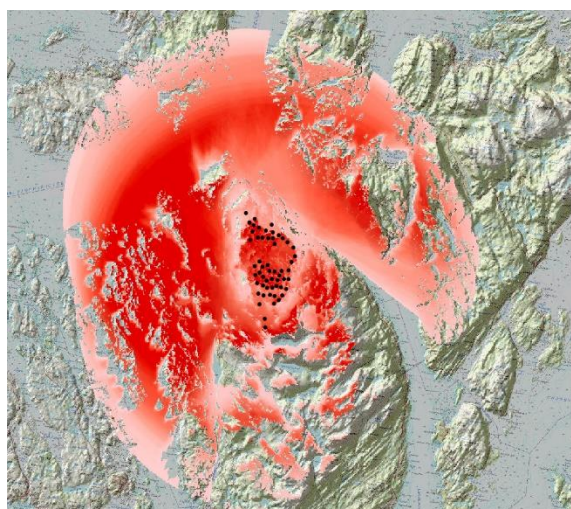
Land				
	Avstand			
Antall synlige turbiner	0-10 km	0-20 km	0-30 km	0-40 km
1-10	3 620.81	5 420.80	6 818.58	7 951.56
11-50	4 137.16	8 085.37	10 879.63	13 137.68
51-100	307.85	1 036.35	1 778.60	2 228.71
>100	0.47	33.58	174.17	296.49
Totalt	8 066.28	14 576.10	19 650.98	23 614.43
Hav				
	Avstand			
Antall synlige turbiner	0-10 km	0-20 km	0-30 km	0-40 km
1-10	2 814.68	8 061.28	14 188.22	20 342.30
11-50	1 904.17	7 268.34	13 729.20	19 814.18
51-100	100.58	1 907.18	4 794.31	8 608.50
>100		130.29	1 715.28	4 610.95
Totalt	4 819.43	17 367.08	34 427.01	53 375.93
Land og Hav				
	Avstand			
Antall synlige turbiner	0-10 km	0-20 km	0-30 km	0-40 km
1-10	6 435.48	13 482.08	21 006.80	28 293.86
11-50	6 041.33	15 353.71	24 608.83	32 951.86
51-100	408.43	2 943.53	6 572.91	10 837.21
>100	0.47	163.87	1 889.45	4 907.43
Totalt	12885.71	31943.183	54077.988	76990.36

4.2 Kartprodukter

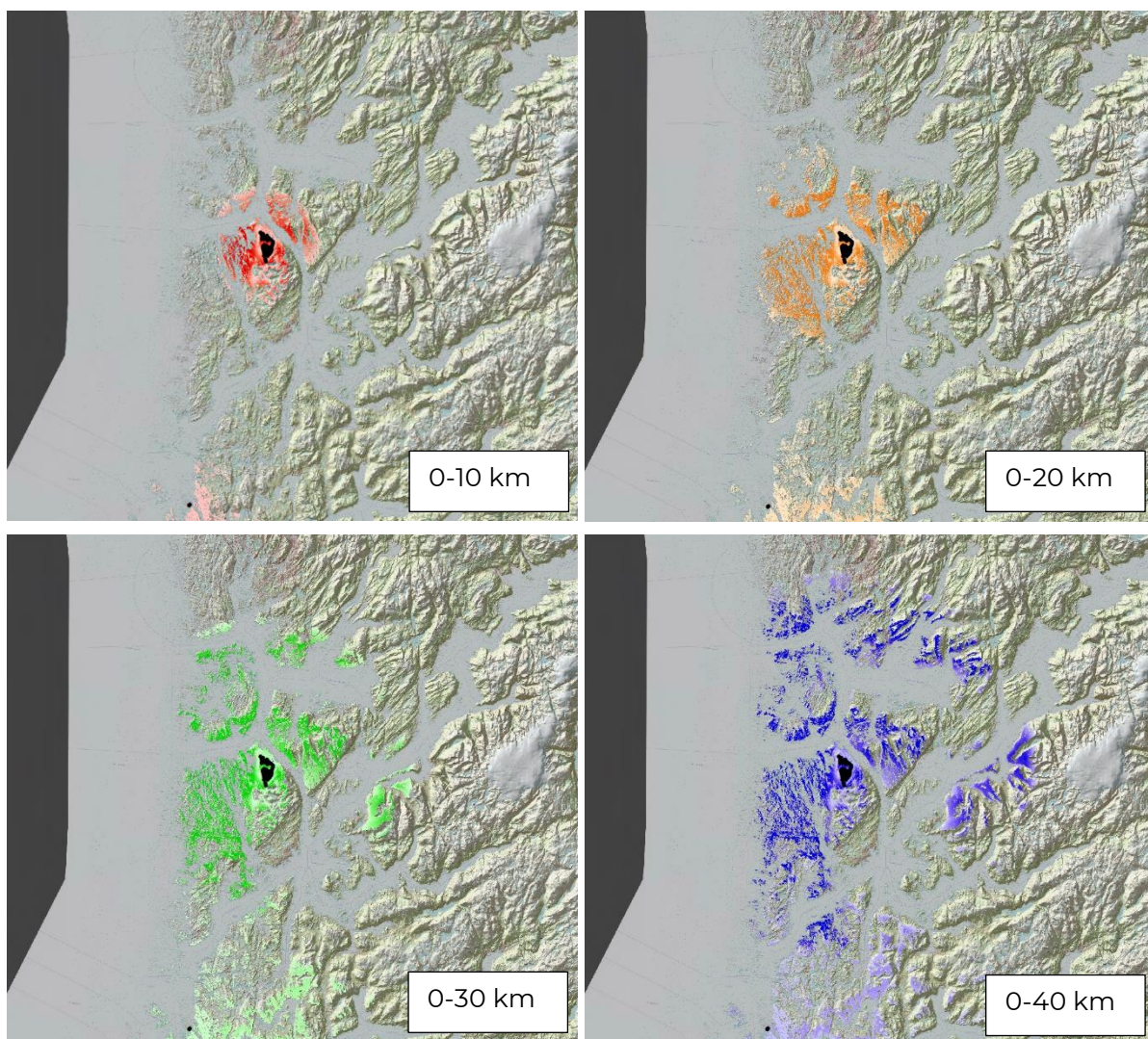
4.2.1 Produkt 1: synlighet antall turbiner



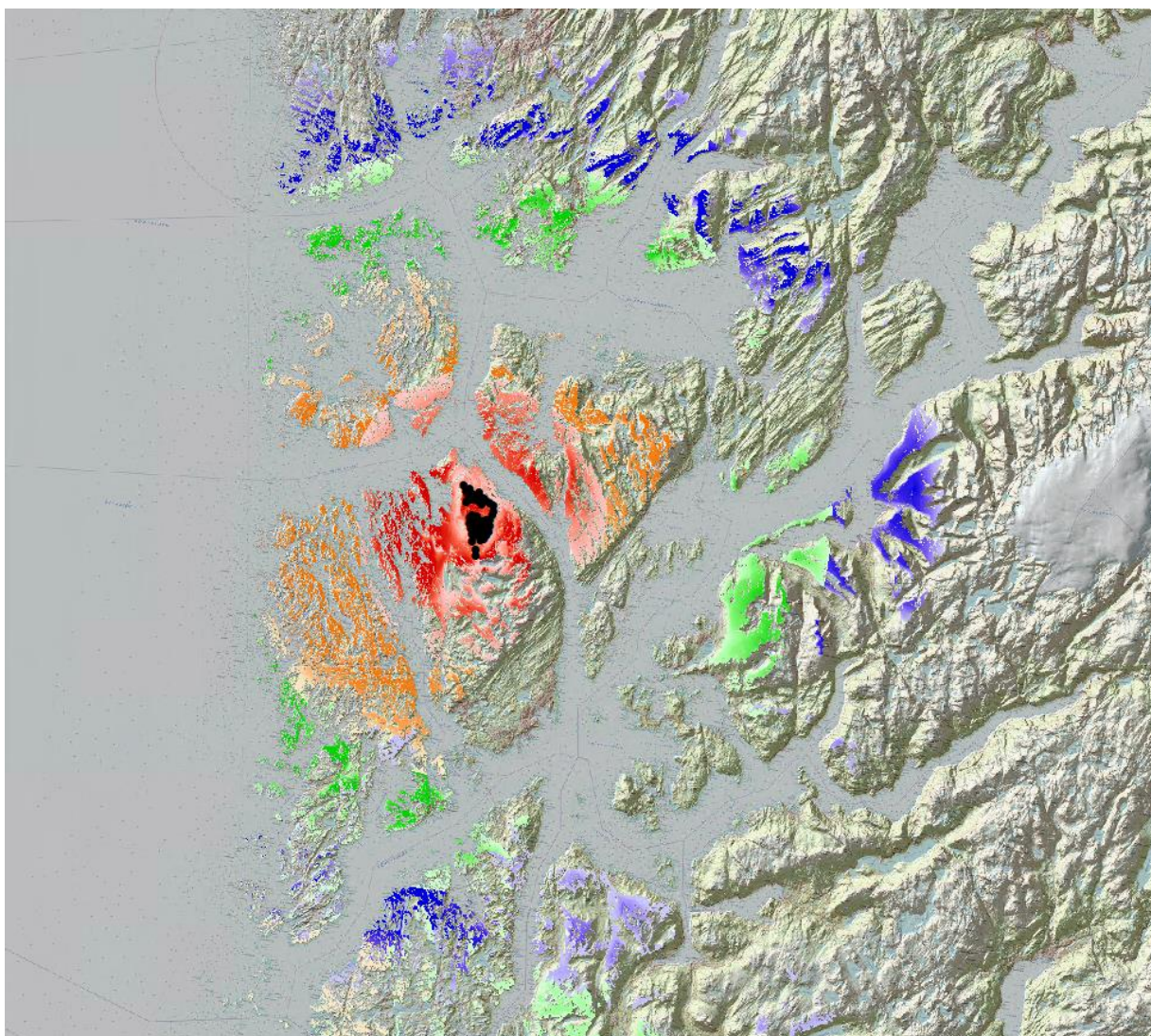
Figur 2. Synlighet av antall turbiner per celle. Til venstre over landområder, til høyre over havet. Maksverdi i dette område er 55 turbiner. Maksimal avstand er 10 kilometer.



Figur 3. Synlighet av antall turbiner per celle. Land og hav kombinert. Maksverdi i dette område er 55 turbiner. Maksimal avstand er 10 kilometer.

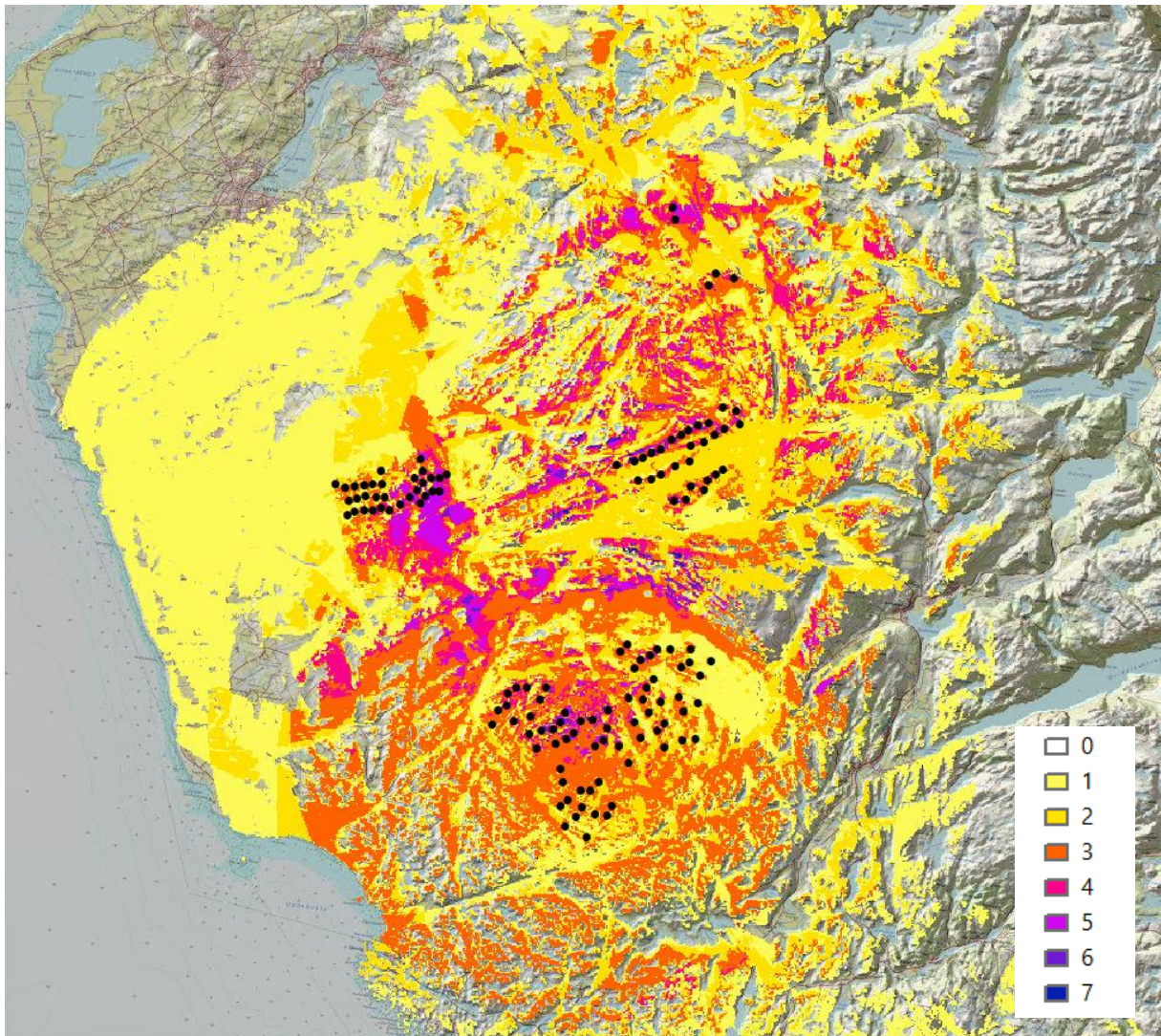


Figur 4. Synlighet av antall turbiner per celle, over landområder, med 4 ulike maksavstander. Maksverdi i dette område er 55 turbiner.



Figur 5. Synlighet av antall turbiner per celle, over landområder, med 4 ulike maksavstander. Sammensatt bilde.

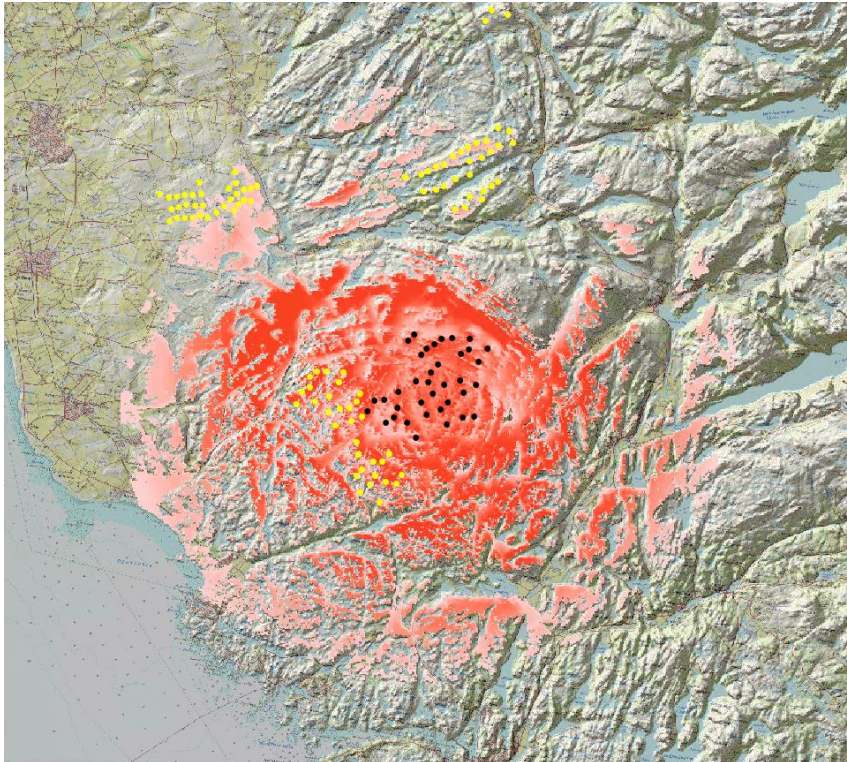
4.2.2 Produkt 2: synlighet antall anlegg



Figur 6. Antall anlegg som er synlig i hver celle, over landområder, med en maksavstand på 10 kilometer. Det finnes 8 ulike anlegg i dette område.

4.2.3 Produkt 3: synlighet antall turbiner, per anlegg separat

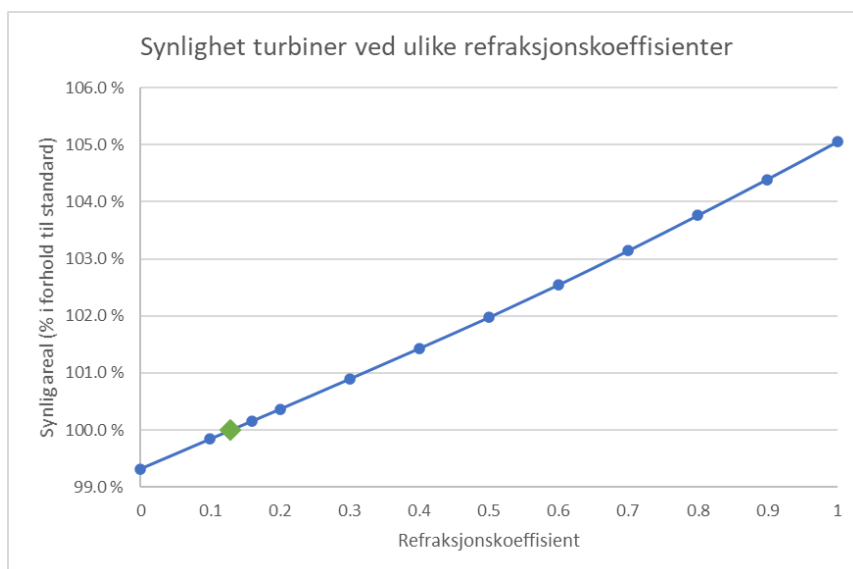
Figuren nedenfor viser et eksempel på synlighetsanalysen per anlegg. Produktet gjør det mulig å evaluere synligheten per anlegg.



Figur 7. Synlighet av antall turbiner per celle for et anlegg separat. Maksimal avstand er 10 kilometer. Det aktuelle anlegget Bjerkreim, visualisert med svarte punkt (turbiner). Andre anlegg er visualisert med gule punkt.

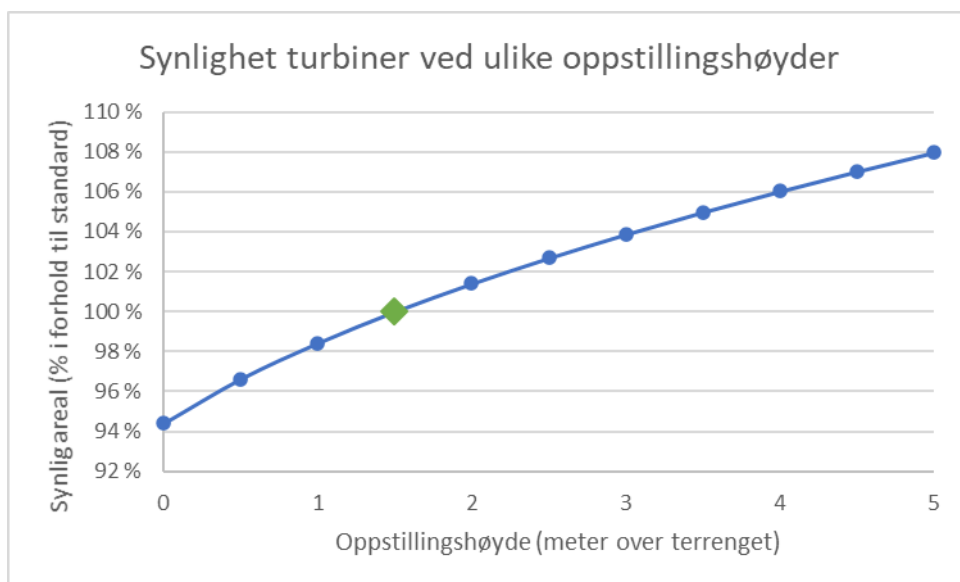
4.3 Sensitivitetsanalyse

Figur 8 viser hvordan synlighetsarealet påvirkes av å velge en annen verdi for refraksjonskoeffisienten i analysene. Figuren viser snittet for analysen av 3 ulike turbiner. Standardverdien (0.13) gir 100% areal. Tabell 3 viser de eksakte tallene. Ganske store endringer viser forholdsvis små utslag: 0 gir 99.3%, mens 0.3 gir 100.9%.



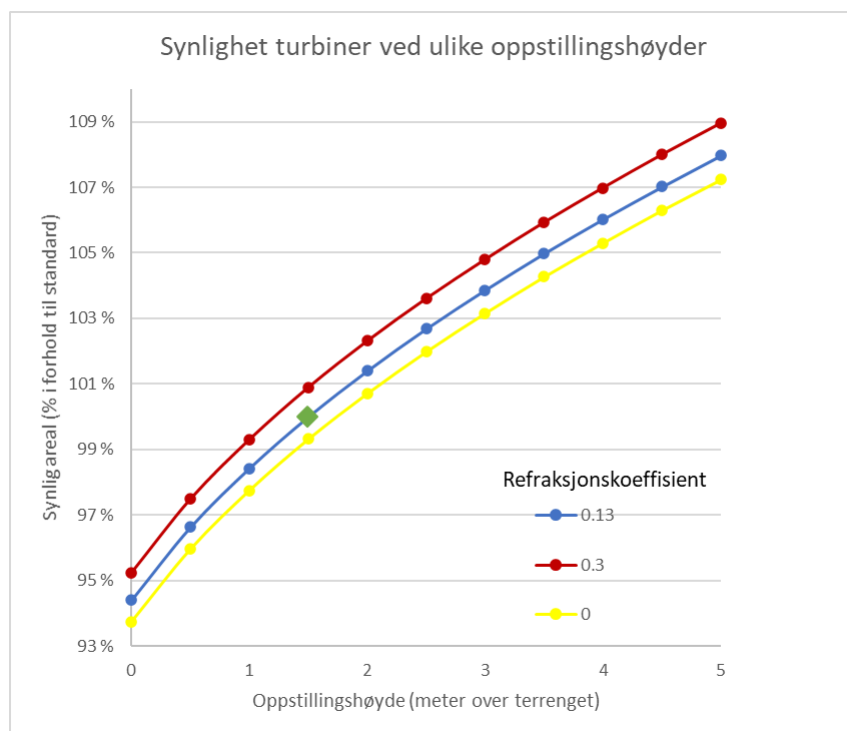
Figur 8. Endring av det synlige arealet for ulike valg av refraksjonskoeffisienten i analysen. Standardverdi er 0.13 og gir 100% areal.

Figur 9 viser hvordan synlighetsarealet påvirkes av å velge en annen verdi for oppstillingshøyden i analysene. Med oppstillingshøyden mener vi høyden til en observatør som står i en celle og derfra ser til turbinene. Selve turbinhøyden endres ikke. Vi ser at en oppstillingshøyde på 0 meter i stedet for 1.5 meter gir 6% mindre areal som er synlig. En fordobling til 3 meter gir nesten 4% mer areal.



Figur 9. Endring av det synlige arealet for ulike valg av oppstillingshøyder i analysen. Standardverdi er 1.5 meter og gir 100% areal.

Figur 10 viser hvordan synlighetsarealet påvirkes kombinasjoner av refraksjonskoeffisient og oppstillingshøyde i analysene. Standardvalget (0.13 og 1.5 meter) er tegnet som en grønn prikk og definerer 100% synlighetsareal. Økning og minskning av verdiene gir ganske konstante utslag og påvirker hverandre ikke mye.



Figur 10. Endring av det synlige arealet for ulike valg av refraksjonskoeffisienten og oppstillingshøyden i analysen. Standardverdi er 0.13 og 1.5 meter og gir 100% areal.

Tabell 3 viser flere kombinasjoner av valgt for refraksjonskoeffisient og oppstillingshøyde. Maksimal utslag ser vi ved en oppstillingshøyde på 5 meter over terrenget og en refraksjonskoeffisient på 1 (som er urealistisk): en økning av synlig areal med 13.5%.

Tabell 3. Endring av det synlige arealet ved ulike valg av refraksjonskoeffisient og oppstillingshøyder. Refraksjonskoeffisient på 0.13 og en oppstillingshøyde på 1.5 meter er standard og gir 100% areal.

Refraksjonskoeffisient	Oppstillingshøyde (m)										
	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
0	93.8 %	96.0 %	97.8 %	99.3 %	100.7 %	102.0 %	103.2 %	104.3 %	105.3 %	106.3 %	107.2 %
0.1	94.2 %	96.5 %	98.3 %	99.8 %	101.2 %	102.5 %	103.7 %	104.8 %	105.9 %	106.9 %	107.8 %
0.13	94.4 %	96.6 %	98.4 %	100.0 %	101.4 %	102.7 %	103.9 %	105.0 %	106.0 %	107.0 %	108.0 %
0.16	94.5 %	96.8 %	98.6 %	100.2 %	101.6 %	102.8 %	104.0 %	105.1 %	106.2 %	107.2 %	108.1 %
0.2	94.7 %	97.0 %	98.8 %	100.4 %	101.8 %	103.1 %	104.2 %	105.4 %	106.4 %	107.4 %	108.4 %
0.3	95.2 %	97.5 %	99.3 %	100.9 %	102.3 %	103.6 %	104.8 %	105.9 %	107.0 %	108.0 %	109.0 %
0.4	95.7 %	98.0 %	99.8 %	101.4 %	102.8 %	104.2 %	105.4 %	106.5 %	107.6 %	108.6 %	109.5 %
0.5	96.2 %	98.5 %	100.4 %	102.0 %	103.4 %	104.7 %	105.9 %	107.1 %	108.1 %	109.2 %	110.1 %
0.6	96.8 %	99.1 %	100.9 %	102.5 %	104.0 %	105.3 %	106.5 %	107.7 %	108.8 %	109.8 %	110.8 %
0.7	97.3 %	99.6 %	101.5 %	103.1 %	104.6 %	105.9 %	107.2 %	108.3 %	109.4 %	110.4 %	111.4 %
0.8	97.9 %	100.2 %	102.1 %	103.8 %	105.2 %	106.6 %	107.8 %	109.0 %	110.1 %	111.1 %	112.1 %
0.9	98.5 %	100.9 %	102.7 %	104.4 %	105.9 %	107.2 %	108.5 %	109.6 %	110.7 %	111.8 %	112.8 %
1	99.1 %	101.5 %	103.4 %	105.0 %	106.5 %	107.9 %	109.1 %	110.3 %	111.4 %	112.5 %	113.5 %

Tabell 4 viser hvordan oppløsningen av terrengmodellen påvirker resultatene. Arealet ved bruk av DTM50 ble satt til 100%. Ved bruk av DTM10 gikk arealet betydelig ned for de tre analyserte turbinene.

Tabell 4. Endring av synlig areal ved bruk av DTM10, sammenlignet med analysen som ble gjort med DT50. ID er turbine ID til de tre turbinene som ble analysert. Maks avstand er 40 kilometer.

ID	DTM50	DTM10
456	100 %	96 %
873	100 %	91 %
1310	100 %	86 %

5 DISKUSJON

Følgende faktorer kan påvirke sluttresultatet:

- Refraksjonskoeffisient
- Oppstillingshøyde
- Oppløsning DTM
- Kvalitet DTM
- 2D-pluss høyde turbin
- Avstander

5.1.1 Refraksjonskoeffisient

Standardverdi for refraksjonskoeffisient i synlighetsanalyser er 0.13. I landmåling er det vanlig å bruke 0.15. Vi fant derimot ingen vitenskapelig litteratur om dette. Atmosfæriske forhold vil påvirke refraksjonskoeffisienten.

Sensitivitetsanalysen viser at små endringer ikke påvirker sluttresultat i stor grad. Se Figur 8. Å bruke 0 i stedet for 0.13 vil gi 99.3% av arealet. Å bruke 0.3 vil gi 100.9% av arealet. Å bruke verdi 0 vil si at lyset ikke bøyer av i det hele tatt. Å bruke verdi 1 vil si at lyset bøyes så mye at man nuller ut effekten av jordkrumningen i analysen.

5.1.2 Oppstillingshøyde

Oppstillingshøyden ble bestemt av oppdragsgiveren. Det er imidlertid interessant å se hva som skjer med arealene når man endrer denne variabelen. Figur 9 og Tabell 3 viser at arealet går ned til 94.4% (av arealet med oppstillingshøyde 1.5 meter) når man bruker 0 meter oppstillingshøyde. Hvis man fordobler oppstillingshøyden til 3 meter over terrenget, går arealet opp til 103.9%.

5.1.3 Kvalitet DTM og oppløsning

Vi har brukt DTM50 i analysene. Grunnen er at det er ansett å være detaljert nok og at 50 meter celler er håndterlige når man analyserer på nasjonalt nivå. Kvaliteten til terrengmodellen vil påvirke analysene. Det meste av Terrengmodeller fra hoydedata.no er basert på detaljerte og nøyaktige laserdata (og bildematchingsdata i en del fjellområder. DTM50 er derimot basert på høydeinformasjon fra N50. Kvaliteten er mye lavere enn laserbaserte produkter.

Nå ser vi imidlertid at, for 3 nærmere analyserte turbiner, det synlige arealet minsker når man bruker DTM10 i stedet for DTM50. Nedgangen er cirka 8% i snitt og alle 3 turbiner gir lavere areal. Vi hadde ikke forventet dette resultatet.

Det hadde vært mulig å nedsample DTM10 (som er basert på laserdata) til 50 meter celler, men det hadde vi ikke tid til nå.

5.1.4 Forenkling turbin-modellen

Turbinen er sterk forenklet: i stedet for et 3D objekt ble den forenklet til et punkt med en topphøyde. I virkeligheten har turbinene også en bredde. Bredden varierer fra 70 meter til 146 meter. Dette gjør at analysen systematisk undervurderer synligheten. Vi har ikke undersøkt hva slags størrelsesorden den undervurderingen er i.

På en annen side er synlighetsanalysen meget inkluderende. Et areal (en celle) defineres som synlig hvis man akkurat kan se toppen av rotorbladet til en turbin. Det kan være så lite som en centimeter (eller millimeter) som setter resultatet til «synlig». Avhengig av avstanden vil det kreve at en viss del av rotorbladet er synlig før man kan si at turbinen er synlig i virkeligheten. Denne effekten overvurderer synligheten til turbinene i analysene våre.

5.1.5 3D og planimetriske avstander

I vår analyse har vi gjort en 3D-siktanalyse per turbin. Etterpå har vi oppsummert resultater i ulike avstandsgrupper. 0-10, 0-20, 0-30, og 0-40 kilometer. Disse avstandene er i 2D (planimetrisk). Så vi har ikke beregnet disse avstandene i 3D (ser opp eller ned til turbinen). Dette har ikke mye å si for resultatene, men det viktig æ være klar over.

6 LEVERANSE

6.1 Produkter

6.1.1 Produkt 1: synlighet antall turbiner

\\Delivery\\20220221_synlighetskart\\Synlighet_turbiner

Name

 land_0-10.tif
 land_0-20.tif
 land_0-30.tif
 land_0-40.tif
 ocean_0-10.tif
 ocean_0-20.tif
 ocean_0-30.tif
 ocean_0-40.tif

6.1.2 Produkt 2: synlighet antall anlegg

Delivery\\20220221_synlighetskart\\Synlighet_anlegg

 land_proj_0-10.tif
 land_proj_0-20.tif
 land_proj_0-30.tif
 land_proj_0-40.tif
 ocean_proj_0-10.tif
 ocean_proj_0-20.tif
 ocean_proj_0-30.tif
 ocean_proj_0-40.tif

6.1.3 Produkt 3: synlighet antall turbiner, per anlegg separat

\\Delivery\\20220221_synlighetskart\\Synlighet_turbiner_per_anlegg

62 mapper med anlegg-id som navn. Innenfor hver mappe ligger det 8 rastre. Anlegg-id er med i filnavn per raster.

 land_5_0-10.tif

 land_5_0-20.tif

 land_5_0-30.tif

 land_5_0-40.tif

 ocean_5_0-10.tif

 ocean_5_0-20.tif

 ocean_5_0-30.tif

 ocean_5_0-40.tif

6.1.4 Øvrige data

\DTM50

Inneholder en zipfil med DTM50 data som ble brukt

\Hillshade

Inneholder en skyggemodell som kan brukes som bakgrunn når man ser på analyseresultatene.

\Landcover

Inneholder en 50 meter raster som skiller mellom hav og land (Norge).

6.2 Detaljer

6.2.1 Filformater

Resultatene leveres som rasterdata.

Filformatet er GeoTif med LZW kompresjon.

Datatypen er unsigned integer 16 bit.

Cellestørrelsen er 50 meter

6.2.2 Koordinatsystem

Dataene leveres i ETRS_1989_UTM_Zone_33N (EPSG: 25833)

REFERANSER

<https://grass.osgeo.org/grass78/manuals/r.viewshed.html>

<https://kartkatalog.geonorge.no/metadata/dtm-50/e25d0104-0858-4d06-bba8-d154514c11d2>

APPENDIX - INFORMASJON OM GRASS VIEWSHED

Grass r.viewshed

<https://grass.osgeo.org/grass78/manuals/r.viewshed.html>

r.viewshed is a module that computes the viewshed of a point on a raster terrain. That is, given an elevation raster, and the location of an observer, it generates a raster output map showing which cells are visible from the given location. The algorithm underlying r.viewshed minimizes both the CPU operations and the transfer of data between main memory and disk; as a result r.viewshed runs fast on very large rasters.

r.viewshed uses the following model for determining visibility: The height of a cell is assumed to be variable, and the actual height of a point falling into a cell, but not identical the cell center, is interpolated. Thus the terrain is viewed as a smooth surface. Two points are visible to each other if their line-of-sight does not intersect the terrain. The height for an arbitrary point x in the terrain is interpolated from the 4 surrounding neighbours. This means that this model does a bilinear interpolation of heights. This model is suitable for both low and high resolution rasters as well as terrain with flat and steep slopes.

The core of the algorithm is determining, for each cell, the line-of-sight and its intersections with the cells in the terrain. For a (square) grid of n cells, there can be $O(n^{1/2})$ cells that intersect the LOS. If we test every single such cell for every point in the grid, this adds up to $O(n^{3/2})$ tests. We can do all these tests faster if we re-use information from one point to the next (two grid points that are close to each other will be intersected by a lot of the same points) and organize the computation differently.

More precisely, the algorithm uses a technique called line sweeping: It considers a half-line centered at the viewpoint, and rotates it radially around the viewpoint, 360 degrees. During the sweep it keeps track of all the cells that intersect the sweep line at that time; These are called the active cells. A cell has 3 associated events: when it is first met by the sweep line and inserted into the active structure; when it is last met by the sweep line and deleted from the active structure; and when the sweep line passes over its centerpoint, at which time its visibility is determined. To determine the visibility of a cell all cells that intersect the line-of-sight must be active, so they are in the active structure. The algorithm looks at all the active cells that are between the point and the viewpoint, and finds the maximum gradient among these. If the cell's gradient is higher, it is marked as visible, whereas if it is lower, it is marked as invisible.